文章编号：1000-5773(2013)01-0057-06

高温 SHPB 冲击实验技术及其应用*

许金余[1]，刘　健[1]，范飞林[1,2]，任韦波[1]，席阳阳[1]，杨　坤[1]

(1.空军工程大学航空航天工程学院，陕西西安　710038；
2.中国人民解放军 93975 部队，新疆乌鲁木齐　830005)

摘要：为研究高温下材料的动态力学性能，研制了一套适用于分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)高温冲击实验的温控系统。利用该温控系统和∅100 mm 常规 SHPB 装置，对混凝土在高温下的动态力学性能进行了实验研究，实验温度分别为 20、200、400、600、800 和 1000 ℃。结果表明：由管式实时加热装置和箱式预加热炉组成的温控系统操作方便，实验效率高，试件组装方法简便可行；热传导导致的试件温度分布不均匀和压杆局部温升对实验结果产生的影响可以忽略，实验技术可靠；高温下混凝土动态力学性能的温度效应十分明显，相同冲击速率下，随温度升高，平均应变率逐渐增大，动态应力-应变曲线逐渐表现出塑性特性，动态抗压强度随温度升高先增大后减小，动态峰值应变随温度升高不断增大。

关键词：高温；分离式霍普金森压杆；实验技术；混凝土；动态力学性能
中图分类号：O347.3；TU528　　**文献标识码**：A

1　引　言

航空航天材料、军事防护工程材料、武器结构材料等多种材料在特殊环境下往往要历经高温、高应变率等极端条件的考验，此时材料的力学性能将受温度和应变率的共同影响，使得高温下材料的高应变率力学行为研究显得尤为重要。高温分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)实验是研究材料高温、高应变率力学行为的一种主要手段，相关实验技术一直是研究的重点和难点。1963 年，Chiddister 等人[1]测试了高温下铝的冲击压缩性能；之后，高温 SHPB 不断应用于混凝土、金属等材料的高温动态力学性能测试领域，相应的实验技术也得到深入研究。近年来，人们进行了很多高温 SHPB 实验研究，例如：Behnam 等人[2]对高温 SHPB 实验中的热传导问题进行了实验研究和数值分析；贾彬[3]、陶俊林[4]、李奎等人[5]采用先加热试件再安装试件进行实验的方法，在∅50 mm SHPB 装置上对水泥砂浆和混凝土材料进行了高温动态压缩实验研究，最高实验温度达 650 ℃；肖大武等人[6]建立了一套在压杆和试件之间添加隔热陶瓷短杆的高温 SHPB 实验系统，并研究了锆的高温动态力学性能；张方举等人[7]提出了一套“SHPB 系统高温实验自动组装装置”；邓志方[8]对高温 SHPB 实验中的界面热传导特性进行了研究；肖桂凤等人[9]论述了采用 Hopkinson 杆测量材料高温动态力学性能的一些技术方法和实验装置；尚兵等人[10]提出了一种高温 SHPB 实验温度修正的差分方法。整体来看，已有研究较多采用先对试件加热再将试件安装到系统进行冲击实验的方法，其优点在于数据处理相对简单。但这些研究存在一定不足，例如：对于高温 SHPB 实验装置，有的将加热和保温分开，保温设备较为简

* **收稿日期**：2011-07-11；**修回日期**：2011-10-05
基金项目：国家自然科学基金(51078350)；军队后勤科研项目
作者简介：许金余(1963－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事结构工程与防护工程研究. E-mail：jyx369@yeah.net
通讯作者：范飞林(1983－)，男，博士研究生，主要从事机场防护工程和材料动态力学性能研究.
E-mail：flybeyond007@163.com

易，有的虽集加热和保温于一体，但每次实验只能加热一块试件，实验效率较低，有的机械自动组装装置的使用效果较好，但改造比较复杂，且组装不易实施，同步组装有一定难度；对混凝土类材料的高温SHPB实验研究相对不足，远不能满足工程应用和数值计算等需要；已有实验研究多局限于小直径SHPB实验，利用∅100 mm SHPB装置对混凝土进行高温实验的研究很少。由于混凝土在微观上属于各向异性材料，骨料尺寸相对较大，利用小直径压杆进行高温实验获得的结果不足以真实反映混凝土的宏观力学性能。基于此，有必要增大试件尺寸，研究大直径高温SHPB实验的温控装置和实验技术，测试高温下材料的动态力学特性。

本研究针对大直径SHPB实验中的高温实验技术，研制一套适用于SHPB实验的温控系统，利用该温控系统和常规∅100 mm SHPB装置，对混凝土在高温下的动态力学性能进行研究，实验温度分别为20、200、400、600、800和1 000 ℃。

2 高温SHPB实验技术

2.1 高温SHPB实验系统组成及特点

高温SHPB实验系统由常规SHPB装置和温控系统组成。常规SHPB装置由主体设备、能源系统、测试系统3部分组成，如图1所示。温控系统包括箱式预加热电炉(见图2)和管式实时加热装置(见图3)两部分。箱式预加热炉的加热元件为“U”型硅碳棒，炉体温度的控制精度为±1 ℃，最高加热温度为1 300 ℃，可对多个试件同时进行热处理。管式实时加热装置安装于入射杆和透射杆之间，由支撑平台和管式加热炉组成，管式加热炉位于支撑平台之上，加热元件为耐高温硅碳棒，内部为圆形炉膛，试件及刚玉管放于炉膛内，其中与试件接触的部分采用耐热钢管，以防止试件破碎损坏炉膛，炉体控温精度为±2 ℃，最高工作温度为1 200 ℃。管式实时加热装置的加热速率较慢，因此实验时先利用箱式预加热炉对多个试件进行预加热，然后逐一装入管式实时加热装置进行冲击加载，从而大大提高实验效率。整个实验系统具有控温精度高、实验效率高、操作安全简便、重复性好的特点。



图1 常规∅100 mm SHPB装置

Fig. 1 General ∅100 mm SHPB device



图2 箱式预加热炉

Fig. 2 Box preheating furnace



图3 管式实时加热装置

Fig. 3 Tube real-time heating device

2.2 试件组装

张方举等人[7]曾提出利用同步组装系统进行快速组装的方法，但其组装系统较为复杂，需要增设气源、气路以及附属设备，改造成本较高，并且组装实验过程复杂，需对气炮气压和推动气压进行对照实验，由于相同气压在不同时间产生的激发速度并不完全相同，存在一定误差，因此精确的同步组装有一定难度。本研究依托管式实时加热装置进行人工组装，在高温下利用辅助器具将试件推入管式炉内指定位置并定位好，人工快速推动入射杆和透射杆到预先标记好的位置，同时下达触发子弹口令，人员迅速撤离，待触发完毕，再迅速将入射杆和透射杆推出管式加热炉进行冷却。依托管式实时加热装置进行的人工组装，具有操作简便、实验过程简单、组装成功率高的优点，同时管式实时加热装置能对试件进行定位和实时控温，大大提高了组装过程的安全性和测试温度的准确性。当然，人工组装时的冷接触时间(即压杆与试件完成对接到入射波到达试件端面的延时)要稍大于同步组装时间。

2.3 高温 SHPB 技术分析

采用只对试件加热、再将试件安装到系统中的方法进行高温 SHPB 实验的关键技术在于试件加热、定位、组装等装置的合理设计及准确使用,要求试件控温准确,冷接触时间足够短,确保热传导造成的试件温度分布不均匀和压杆局部温升对实验结果的影响足够小。

根据已有研究[7-8],在一定条件下,导杆上存在的局部温升不影响导杆的弹性性能,对于∅22 mm 的钢质压杆和小尺寸钢质试件,当初始温度低于 1 000 ℃、冷接触时间小于 0.5 s 时,冷接触导致的试件温度分布不均匀对实验结果的影响可以忽略。本研究的高温 SHPB 技术是为在较大直径的合金钢质压杆上进行混凝土、岩石等脆性和热惰性材料的高温冲击实验而设计的,利用管式实时加热装置进行温控和定位,试件温度的均匀性大大提高,试件定位准确稳定,采用人工组装方法时,冷接触时间能控制在 0.5 s 以内。对于较大尺寸的混凝土、岩石等脆性和热惰性材料,由于其热传导系数远小于金属材料,比热较大,并且"冷接触"造成的试件温度损失可通过实时控温来减少,所以试件温度的不均匀性大大降低。由于接触时间很短,根据已有研究结果,导杆上存在的局部温升不影响压杆的弹性性能。

综合以上分析,可以认为热传导导致的试件温度分布不均匀和压杆局部温升对实验结果的影响足够小,可以忽略不计,高温 SHPB 实验技术可靠。

3 混凝土的高温 SHPB 实验

3.1 实验设计

应用自行研制的高温实验技术(见第 2 节),在∅100 mm SHPB 装置上对混凝土进行高温冲击实验。实验温度分别为 20、200、400、600、800 和 1 000 ℃,压杆和子弹材料为合金钢,气压均为 0.5 MPa,弹速均在 10 m/s 左右。混凝土试件的加热速率为 10 ℃/min,温度达到指定值后,恒温 5 h,然后再对试件进行高温冲击实验。每种温度下测量 3 个试件,共 18 个试件。

3.2 原料、配比和试件

原料:P.O 42.5R 水泥,陕西秦岭水泥股份有限公司生产;硅灰,西安霖源微硅粉有限公司生产;粉煤灰,韩城第二发电厂提供;骨料,细骨料为灞河中砂,粗骨料为泾阳县石灰石碎石;水,自来水;FDN 高效减水剂,广州建宝新型建材有限公司生产。混凝土的配合比见表 1。对标准养护 28 d 后的长圆柱混凝土试件进行切割和水磨加工,用于实验的圆柱形混凝土试件的几何尺寸约为∅98 mm×48 mm。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of concrete (kg/m^3)

Cement	Silicon ash	Fly ash	Sand	Cracked stone	Water	FDN water reducing agent
375	25	125	690	1030	180	5

3.3 波形整形技术与数据处理

采用波形整形技术[11],通过在入射杆端面中心粘贴 H62 黄铜波形整形器,改善入射波形。图 4 给出了采用波形整形技术后混凝土高温冲击实验记录的典型原始波形。

高温 SHPB 实验的数据处理方法与常温 SHPB 实验相同,即测试压杆的入射应变 ε_i、反射应变 ε_r 和透射应变 ε_t,根据一维应力波理论,结合均匀性假设($\varepsilon_i+\varepsilon_r=\varepsilon_t$),采用三波法[12],由 ε_i、ε_r 和 ε_t 计算得到试件中的平均应力、平均应变和平均应变率。

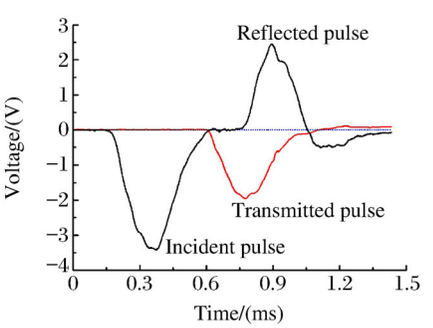


图 4 SHPB 测试得到的原始曲线

Fig. 4 Original records of a typical SHPB test

3.4 实验结果与讨论

3.4.1 实验结果

测得常温下混凝土的静态抗压强度 $f_{c,s}$ 为 60.4 MPa。对每种温度下 3 个试件得到的数据求均值，得到 6 组数据。不同温度下混凝土的平均应变率 $\dot{\varepsilon}_{ave}$ 、动态抗压强度 $f_{c,d}$ 和动态峰值应变 ε_p 如表 2 所示。

表 2 SHPB 实验结果

Table 2 Experimental results of SHPB

T/(℃)	$\dot{\varepsilon}_{ave}$ /(s^{-1})	$f_{c,d}$/(MPa)	ε_p	T/(℃)	$\dot{\varepsilon}_{ave}$ /(s^{-1})	$f_{c,d}$/(MPa)	ε_p
20	75.2	130.5	0.006 76	600	69.1	129.6	0.018 62
200	53.0	175.0	0.012 55	800	96.8	37.3	0.033 43
400	62.7	144.0	0.016 51	1 000	103.0	9.1	0.038 89

3.4.2 应变率变化曲线和动态应力-应变曲线分析

图 5 和图 6 分别为高温下混凝土的应变率变化曲线和动态应力-应变曲线。从图 5 可以看出：冲击速率相同时，不同温度下混凝土的应变率变化曲线表现出显著的温度效应；随着温度升高，平均应变率 $\dot{\varepsilon}_{ave}$ 逐渐增大。

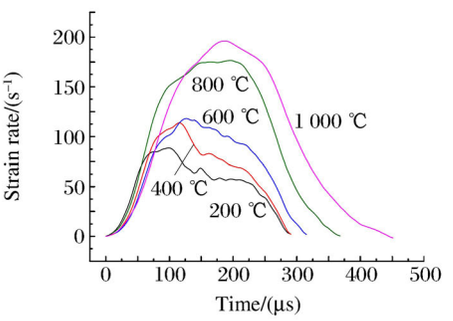


图 5 不同温度下混凝土的应变率变化曲线

Fig. 5 Strain rate-time curves of concrete at different temperatures

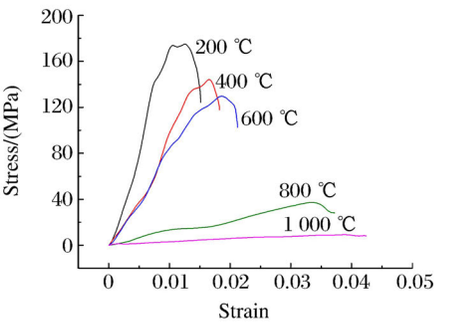


图 6 不同温度下混凝土的动态应力-应变曲线

Fig. 6 Dynamic stress-strain curves of concrete at different temperatures

从图 6 可以看出，相同冲击速率时，不同温度下混凝土的动态应力-应变曲线也表现出显著的温度效应。动态应力-应变曲线在较快的初始上升段后，随着应变的增加，应力上升速率逐渐减慢，曲线逐渐变得平缓，说明在弹性受力阶段之后，材料开始产生塑性变形，进入塑性变形阶段，材料随温度升高逐渐表现出塑性特性，并且温度越高，塑性特性越明显，1 000 ℃时动态应力-应变曲线的上升段十分平缓，存在明显的塑性阶段。高温下混凝土动态应力-应变曲线的卸载段斜率较大，说明试件破坏后卸载很快。其原因应该是：混凝土经热处理后，因高温产生的大量热损伤（如水分蒸发形成的孔隙和裂缝、变形差、内应力、骨料膨胀破裂等）不断发展和积累，形成大量微裂缝（实验时可明显看到热处理后试件表面出现很多微裂缝），使混凝土的强度和变形性能恶化[13]，遭受的冲击力达到强度极限后，试件中的大量微裂缝立即扩展和贯通，使试件瞬时完全破坏，在曲线上表现为应力达到峰值后，材料开始破坏，同时发生卸载，并且卸载速度很快，在很短时间内丧失承载能力。

3.4.3 动态抗压强度和动态峰值应变随温度的变化规律

高温下混凝土的动态抗压强度 $f_{c,d}$ 随温度 T 的变化情况如图 7 所示，动态峰值应变 ε_p 随温度 T 的变化情况如图 8 所示。由图 7 可见，随着实验温度从常温（20 ℃）升高到 1 000 ℃，动态抗压强度表现出先升高后降低的变化规律，最高可达 175.0 MPa，最低为 9.1 MPa，温度效应十分明显。在 20～200 ℃范围内，动态抗压强度逐渐增大；200 ℃以后，动态抗压强度逐渐减小；在 600～800 ℃范围内，动态抗压

强度开始低于常温下的静态抗压强度;1 000 ℃时,动态抗压强度变得极小。由图 8 可见,随着实验温度从常温(20 ℃)升高到 1 000 ℃,动态峰值应变不断增大,从 0.006 76 增加到 0.038 89,并且温度越高,动态峰值应变越大。在静态受力条件下,当温度为 200～300 ℃时,混凝土强度有可能超过常温时的强度,其原因可能是水泥凝胶体内的结合水开始脱出,有利于加强胶合作用及缓和缝端的应力集中;400 ℃以后,动态抗压强度急剧下降[13];在冲击荷载作用下,低于 400 ℃时,由于温度和应变率的共同影响,常温下的动态抗压强度比高温时的小,应该是温度和应变率对混凝土微观结构的共同作用结果。

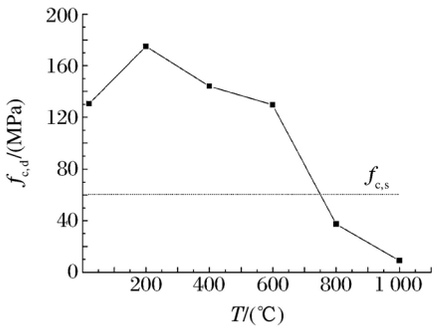


图 7　混凝土的动态抗压强度随温度的变化

Fig. 7　Variation of dynamic compressive strength of concrete with temperature

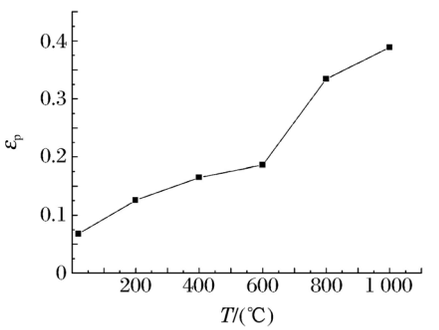


图 8　混凝土的动态峰值应变随温度的变化

Fig. 8　Variation of dynamic peak strain of concrete with temperature

4　结　论

设计并介绍了一种用于材料高温动态力学性能测试的 SHPB 实验技术,并将其应用在高温下混凝土动态力学性能研究中,得到以下结论:(1) 由箱式预加热炉和管式实时加热装置组成的温控系统操作方便,实验效率高,试件组装方法简便可行;(2) 热传导导致的试件温度分布不均匀和压杆局部温升对实验结果产生的影响可忽略不计,实验技术可靠;(3) 高温下混凝土动态力学性能的温度效应十分明显,相同冲击速率下,随着温度的升高,平均应变率逐渐增大,动态应力-应变曲线逐渐表现出塑性特性,动态抗压强度随温度升高先增大后减小,动态峰值应变随温度升高不断增大。

References:

[1] Chiddister J L, Malvern L E. Compression-impact testing of aluminum at elevated temperatures [J]. Exp Mech, 1963, 3(4): 81-90.

[2] Davoodi B, Gavrus A, Ragneau E. An experimental and numerical analysis of the heat transfer problem in SHPB at elevated temperatures [J]. Meas Sci Technol, 2005, 16(10): 2101-2108.

[3] Jia B, Li Z L, Tao J L, et al. SHPB test on high temperature dynamical mechanical behavior of concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(21): 34-37. (in Chinese)
贾　彬, 李正良, 陶俊林, 等. 混凝土高温动态特性 SHPB 试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(21): 34-37.

[4] Tao J L, Qin L B, Li K, et al. Experimental investigation on dynamic compression mechanical performance of concrete at high temperature [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(1): 101-106. (in Chinese)
陶俊林, 秦李波, 李　奎, 等. 混凝土高温动态压缩力学性能实验 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 101-106.

[5] Li K, Tao J L. Research on impact compressive experiment and dynamic mechanic behavior of cement mortar at high temperature [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(24): 22-27. (in Chinese)
李　奎, 陶俊林. 水泥砂浆高温 SHPB 实验及动态力学特性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(24): 22-27.

[6] Xiao D W, Li Y L, Hu S S. High temperature SHPB system with heat insulation for short ceramic bars [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(1): 37-42. (in Chinese)

肖大武,李英雷,胡时胜. 组合式隔热陶瓷短杆高温 SHPB 实验技术 [J]. 高压物理学报,2010,24(1):37-42.

[7] Zhang F J,Xie R Z,Tian C J,et al. Auto-assembling technique used in high temperature experiment of SHPB [J]. Journal of Experimental Mechanics,2005,20(2):281-284. (in Chinese)
张方举,谢若泽,田常津,等. SHPB 系统高温实验自动组装技术 [J]. 实验力学,2005,20(2):281-284.

[8] Deng Z F. Interface heat transfer characteristics and its effects in elevated temperature SHPB experiments [D]. Mianyang:China Academy of Engineering Physics,2006:48-49. (in Chinese)
邓志方. 高温 SHPB 试验中的界面热传导特性及其影响 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006:48-49.

[9] Xiao G F,Tao J,Jiang X Q. SHPB technique for dynamic mechanical properties testing of materials at high temperature [J]. Journal of Sichuan Ordnance,2010,31(10):79-81. (in Chinese)
肖桂凤,陶 洁,姜锡权. 用于测量材料高温动态力学性能的 SHPB 技术 [J]. 四川兵工学报,2010,31(10):79-81.

[10] Shang B,Wang T T,Zhuang Z. Difference scheme for modifying the experimental temperature in high-temperature SHPB test [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2010,24(3):219-224. (in Chinese)
尚 兵,王彤彤,庄 茁. 高温 SHPB 实验温度修正的差分方法 [J]. 高压物理学报,2010,24(3):219-224.

[11] Li W M,Xu J Y. Pulse shaping techniques for large-diameter split Hopkinson pressure bar test [J]. Acta Armamentarii,2009,30(3):350-355. (in Chinese)
李为民,许金余. 大直径分离式霍普金森压杆试验中的波形整形技术研究 [J]. 兵工学报,2009,30(3):350-355.

[12] Wang L L. Foundation of Stress Waves [M]. Beijing:National Defence Industry Press,2005:51-60. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 北京:国防工业出版社,2005:51-60.

[13] Guo Z H,Shi X D. Reinforced Concrete Theory and Analyse [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003:395-400. (in Chinese)
过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2003:395-400.

A High Temperature SHPB Impact Experimental Technique and Its Application

XU Jin-Yu[1],LIU Jian[1],FAN Fei-Lin[1,2],
REN Wei-Bo[1],XI Yang-Yang[1],YANG Kun[1]

(1. *Aerospace Engineering Institute,Air Force Engineering University,Xi'an* 710038,*China*;
2. 93975 *Unit of the PLA,Urumqi* 830005,*China*)

Abstract: A set of temperature-controlling system adapted to high temperature split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments is developed and presented. Using this high temperature SHPB system comprised of a temperature-controlling system and a general ∅100 mm SHPB apparatus, the dynamic mechanical properties of concrete are investigated at 20, 200, 400, 600, 800 and 1 000 ℃, respectively. The experimental results show that the temperature-controlling system composed of a box preheating furnace and a tube real-time heating device is convenient to operate and can improve efficiency greatly, and the sample assembly method is simple and feasible; the temperature variance of sample and the local temperature rising of pressure bar due to heat conduction can be ignored, and the experimental technique is reliable. Temperature effects on dynamic mechanical properties of concrete at high temperature are obvious. With temperature increasing, the average strain rate and dynamic peak strain increase gradually, and the dynamic stress-strain curves exhibit plastic properties; moreover, the dynamic compressive strength rises at first and then falls.

Key words: high temperature; split Hopkinson pressure bar; experimental technique; concrete; dynamic mechanical property